

MgO 완충층을 이용한 Si 기판상 강유전체 BaTiO₃박막의 제조

김 상 설

순천대학교 금속공학과, 무기재료분야
(1997년 1월 21일 접수)

Preparation of Ferroelectric BaTiO₃ Thin Films on MgO-Buffered Si Substrates

Sangsub Kim

Dept. of Materials Science & Metallurgical Engineering
Suncheon National University
(Received January 21, 1997)

요 약

Si(100) 기판에 스퍼터링 방법으로 MgO박막을 제조하고, 그 위에 강유전체 BaTiO₃박막을 증착하여 MgO박막의 완충층으로서의 효과를 조사하였다. MgO박막의 방향성 및 결정구조를 증착온도에 따라 조사한 결과, 낮은 증착온도에서는 충분히 결정화되지 않은 MgO박막이 얻어졌으며, 700°C의 증착온도에서 (001) 우선배향을 가진 MgO박막이 얻어졌다. MgO박막이 형성된 Si 기판에서는 부분적으로 (001) 혹은 (h00) 배향된 BaTiO₃박막이 성장되었고, 반면에 MgO박막이 없는 Si 기판에서는 무질서하게 배향된 BaTiO₃박막이 성장되었으며, 박막의 표면에서는 큰 균열이 발달하였다. MgO 완충층 박막을 적용한 Si 기판과 적용하지 않은 Si 기판에 각각 제조된 BaTiO₃박막의 결정 방향, 미세구조, 전기적특성 등을 비교한 결과, MgO박막은 Si(100) 기판에 배향된 BaTiO₃박막을 제조하기 위한 효과적인 완충층임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

A study on the deposition and characterization of BaTiO₃ thin films on MgO-buffered Si(100) substrates by sputtering was conducted. The MgO buffer layers were investigated as a function of deposition temperature. At lower substrate temperature, the MgO layers were not fully crystalline, but a crystallized MgO layer with (001) preferred orientation was obtained at the substrate temperature of 700°C. Partially (001) or (h00) textured BaTiO₃ films were obtained on Si(100) with the MgO buffer layer grown at 700°C. While, randomly oriented BaTiO₃ films with large-scale cracks on the surface were made without the MgO layer. The crystallographic orientation, morphology and electrical properties between the BaTiO₃ films on Si with and without the MgO layer were compared using the BaTiO₃ film on MgO(100) single crystal substrate as a reference system. Also the favorable role of the MgO layer as a buffer for growing of oriented BaTiO₃ films on Si substrates was confirmed.

Key words : Buffer layer, BaTiO₃ film, MgO film, Ferroelectric thin film, Sputtering

1. 서 론

최근 국내외적으로 BaTiO₃를 비롯한 강유전체 박막을 비휘발성기억소자, 박막캐패시터, 적외선센서, 광전소자 등에 적용하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특별히 에피탁시(epitaxy)하거나 혹은 배향된 강유전체 박막의 물성이 무질서한 다결정의 박막보다 우수하다고 알려져 있다.^{1,2)} 강유전체 BaTiO₃ 에피탁시

박막은 MgO³⁾, SrTiO₃⁴⁾, LaAlO₃⁵⁾ 등의 산화물 단결정 기판에 다양한 박막제조방법을 이용하여 성공적으로 제조되고 있다. 그런데 BaTiO₃박막의 소자적용을 위해서는 산화물 단결정 기판보다 가격이 저렴할 뿐만 아니라 기존 반도체 제조공정에 쉽게 적용할 수 있는 장점에 Si 기판에 BaTiO₃박막을 제조하는 것이 유리하다. 그러나 Si 기판에 직접 BaTiO₃박막을 증착할 경우 기판과 박막의 상호확산으로 인하여 배향된 BaTiO₃박막을 얻

기가 대단히 어렵다.^{7,8)}

상호확산을 방지하면서 우수한 품질의 강유전체 산화물 박막을 제조하기 위하여 Si 기판과 강유전체 박막 사이에 적당한 완충층(buffer layer)을 삽입하는 방법이 모색되고 있다. MgO^{9,12)}, YSZ(yttria-stabilized zirconia)¹³⁾, TiN¹⁴⁾, CeO₂¹⁵⁾ 등이 완충층재료로 연구되고 있으며, 그 중에서 특히 MgO는 화학적으로 안정하여 Si 기판과 강유전체 박막 사이의 상호확산을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 격자상수 및 결정의 대칭성에 있어서도 대부분의 페로브스카이트(perovskite)계 강유전체의 에피택시 박막제조를 위한 기판으로 사용이 가능하다. 이러한 MgO박막은 스퍼터링¹⁰⁾, metalorganic chemical vapor deposition^{9,12)}, evaporation¹¹⁾ 등의 다양한 증착방법으로 Si 기판에 제조되었으며, 일부는 초전도 NbN¹⁶⁾ 및 YBCO¹⁷⁾ 박막의 제조를 위한 완충층으로 적용된 사례도 있다.

본 연구에서는 스퍼터링 방법으로 Si(100) 기판에 MgO박막을 제조하고, 그 위에 강유전체 BaTiO₃박막을 증착하여 MgO박막의 완충층으로서의 효과를 조사하였다. 기판온도에 따른 MgO 완충층 박막의 배향성 및 미세구조를 조사한 다음, MgO 완충층 박막을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 Si 기판에 BaTiO₃박막을 제조하여 박막의 배향성, 미세구조, 전기적성질 등을 연구하였다.

2. 실험방법

MgO 및 BaTiO₃박막은 rf 마그네트론 스퍼터링(radio frequency magnetron sputtering)장치를 이용하여 제조하였다. MgO 스퍼터링 타겟은 MgO분말을 몰드를 사용하여 성형한 후 대기분위기에서 1450°C, 2시간 소결하여 제조하였다. BaTiO₃ 타겟은 BaCO₃와 TiO₂ 분말을 1:1 몰비로 혼합한 다음 일반적인 세라믹 성형공정을 거친 후 대기분위기에서 1350°C, 1시간 소결하여 제조하였다.

기판은 상용 판매되는 Si(100) 웨이퍼를 사용하였으며, 증착하기 전에 아세톤 및 메탄올을 사용하여 각각

10분간 초음파 세척하였다. Si 웨이퍼에 형성되어 있는 자연산화막(native silicon oxide)의 제거는 고품질의 박막을 얻기 위한 중요한 전처리 공정으로 알려져 있는데¹⁸⁾, 본 실험에서는 자연산화막을 제거하기 위하여 역스퍼터에칭(reverse sputter etching)방법을 사용하였다. 즉 Si 웨이퍼를 진공챔버에 장입한 후 10⁻⁵ Pa의 기저압력(base pressure)에 도달하였을 때, 챔버내의 압력이 1 Pa이 되도록 Ar을 주입하고 Si 기판쪽이 음극이 되도록 50 W의 역전압을 인가하여 30분간 역스퍼터링을 실시하였다. 이러한 에칭공정이 완료된 후 박막을 증착하기 위한 정상 스퍼터링(normal sputtering)을 실시하였다. HF를 사용하여 자연산화막을 제거한 경우보다 스퍼터에칭을 채택했을 때 보다 우수한 결정성을 지닌 MgO박막을 제조할 수 있었으며, 이에 관한 자세한 결과는 추후에 보고할 예정이다.¹⁹⁾ 한편 BaTiO₃박막 제조를 위한 스퍼터링 조건의 최적화를 위하여 MgO(100) 단결정 기판을 사용하여 에피택시 BaTiO₃박막을 제조하고자 하였으며, Table 1의 스퍼터링 조건을 적용하여 그 실험이 가능하였다.

제조된 박막의 결정성 및 배향성을 조사하기 위하여 X-선 회절 θ -2 θ 및 ϕ 분석을 실시하였고, 표면 미세구조는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 박막의 두께는 Dektak 3030 profiler를 사용하여 측정하였으며, 단면 SEM 관찰로 보정하였다. 전기적 특성을 분석하기 위하여 허부전극은 Pt를 스퍼터링 방법으로 증착하여 사용하였다. 상부전극으로 마스크를 사용하여 1.5×1.5 mm² 크기의 Pt박막을 증착하여 MIM(metal-insulator-metal) 구조를 형성시킨 다음 주파수에 따른 유전상수를 Schlumberger 1260 impedance 분석기로 측정하였다. Table 1에 MgO, BaTiO₃ 및 Pt박막을 제조하기 위하여 본 실험에서 적용한 스퍼터링 조건을 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

Si(100) 기판에 증착온도를 달리하여 성장된 MgO박막의 X선 회절분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 증착온

Table 1. Sputtering Conditions for the Preparation of MgO, BaTiO₃ and Pt Thin Films.

	MgO film	BaTiO ₃ film	Pt film
Target	Sintered MgO	Sintered BaTiO ₃	Metal Pt
Sputtering Gas	Ar	Ar	Ar
Gas Pressure	1 Pa	1 Pa	0.5 Pa
Input Power	30 W	40 W	6 W
Substrate Temperature	400-700°C	800°C	600°C
Deposition Rate	100 nm/h	150 nm/h	100 nm/h

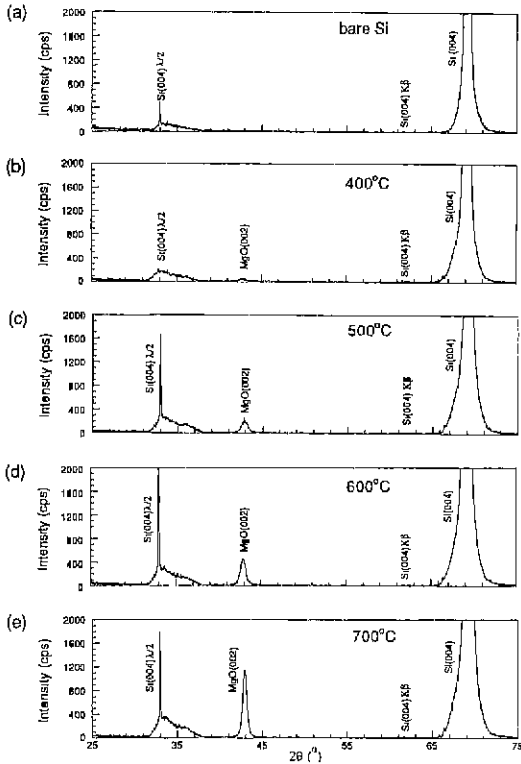


Fig. 1. X-ray θ - 2θ diffraction patterns of (a) Si substrate and the MgO films grown on Si at (b) 400°C (c) 500°C (d) 600°C (e) 700°C.

도가 400°C일 경우 매우 약한 MgO(002) 피크가 관찰되며, 증착온도가 높을수록 MgO(002) 피크의 강도가 증가함을 알 수 있다. 증착온도가 700°C일 경우에 강한 MgO(002) 피크만 관찰되는 것으로 보아 MgO박막은 Si(001) 기판표면과 평행한 방향으로 MgO(001)면이 배향되어 성장되었다고 판단된다. Si(100) 기판에 MgO박막을 제조한 기존의 보고들을 살펴보면 증착온도에 따라 MgO박막의 성장방향이 변화하는 것으로 알려져 있고^{9,12)}, 특히 700°C의 증착온도에서 성장된 MgO박막의 경우 강한 (111) 우선배향을 보인다는 보고도 있다.⁹⁾ 그러나 본 실험에서 실시한 증착온도 범위에서는 MgO박막의 우선배향이 변화되는 것을 관찰할 수 없었고 항상 (001) 우선배향이었다.

증착된 MgO박막의 미세구조를 Fig. 2에 보였다. 400°C에서 증착된 박막은 평활한 표면형상을 보이고 있는 반면, 500°C에서 증착된 박막의 경우에는 입방정 형태의 입자가 표면에서 관찰되고, 아울러 평균지름이 약 1000 nm의 hill-rock이 존재함을 알 수 있다. 관찰된 입방정 입자는 rock salt 형태의 구조를 가진 재료가 나타내는 전형적인 facetting 현상으로 판단된다. 600°C인 경우에는 이러한 hill-rock의 크기가 증가하였으나, 오히려 700°C에서는 hill-rock의 크기가 상당히 감소하였으며 표면형상도 상대적으로 평활해짐을 알 수 있다. 이때의 박막두께는 약 350 nm이었다.

700°C의 증착온도에서 제조된 MgO박막과 Si 기판과

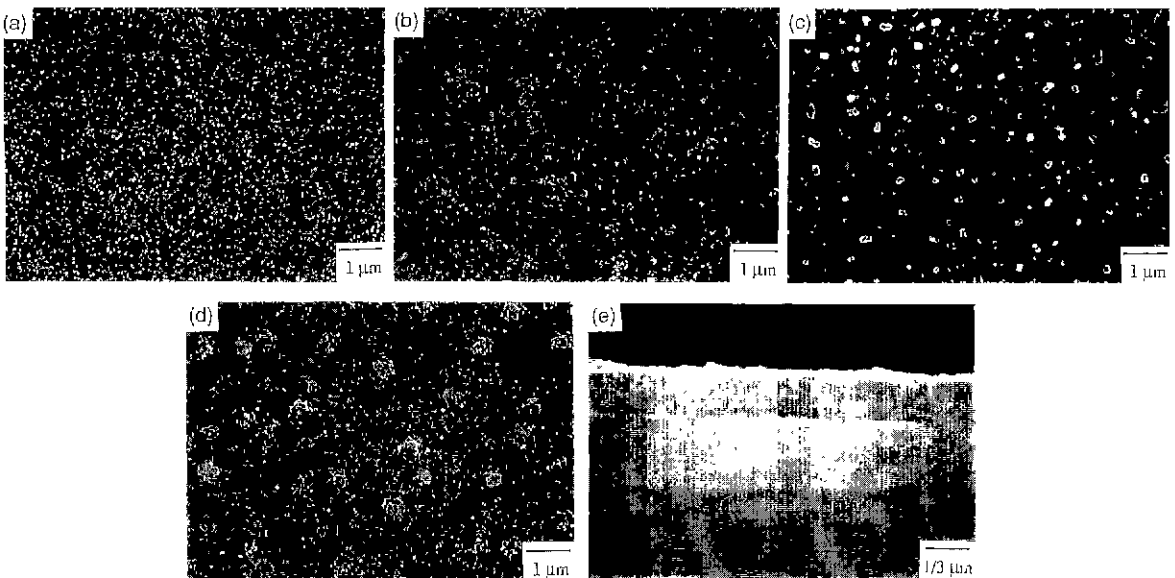


Fig. 2. Surface SEM images of the MgO films on Si grown at (a) 400°C (b) 500°C (c) 600°C (d) 700°C (e) cross-sectional image of the MgO film grown at 700°C.

의 배향관계를 더욱 자세하게 조사하기 위하여 4축 goniometer를 사용, MgO{220}면에 대한 ϕ 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 4개의 피크만이 90° 마다 관찰되는 것으로 보아 MgO박막내에서 특별한 평면상 불일치(in-plane misorientation)가 존재하지 않는다고 판단된다. Fig. 1 및 Fig. 3의 X선 분석을 통하여 MgO박막과 Si 기판 사이의 방향관계는 MgO(001)||Si(001), MgO[100]||Si[100]을 알 수 있으며, 이 방향관계는 MgO의 격자상수와 Si의 격자상수가 각각 0.421 nm와 0.543 nm임을 고려하면 22.5%의 격자어긋남(lattice mismatch)이 발생한다. 이러한 MgO박막의 방향관계는 Fork 등²⁰⁾이 laser ablation으로 Si(100)기판에 제조한 MgO박막의 방향관계와 일치한다. 비록 700°C에서 제조된 MgO박막의 X선 회절분석은 그 박막이 에피택시에 유사한 배향을 가진다고 보이지만, Fig. 3의 미세구조, 특히 입방정 입자의 무질서를 감안하면 에피택시라고 하기 보다는 (001)로 우선배향된 박막이라고 판단된다.

MgO(100) 단결정, Si(100) 및 MgO/Si(100) 기판에 증착한 BaTiO₃박막의 X선 회절분석을 Fig. 4에 나타내었다. 이때 MgO 완충층은 700°C에서 제조된 MgO박막을 채택하였으며 그 두께는 약 100 nm였다. 한편 MgO 단결정 기판의 경우는 MgO 완충층의 효과를 검증하기 위한 기준으로 사용하고자 선정하였다. Fig. 4(a)의 MgO(100) 단결정 기판에 성장된 BaTiO₃박막은 매우 강한 BaTiO₃(001)피크들만 관찰되는 것으로 보아 에피택시 박막일 가능성이 높으며, 실제로 이 박막은 TEM 분석 및 비대칭 X선 회절분석을 통하여 우수한 품질의 에피택시 박막임이 확인되었다.¹⁾ Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)의 BaTiO₃박막은 Fig. 4(a)의 에피택시 BaTiO₃박막제조에 사용된 스퍼터링 조건을 동일하게 적용하여 제조하였다. Fig. 4(b)의 MgO 완충층이 존재하지 않는 Si(100) 기판에 성장된 BaTiO₃박막은 특별한 우선배향성이 관찰되지 않는다. 피크의 강도를 단순히 비교하면 (110)

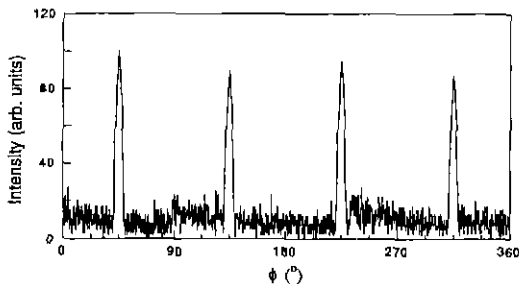


Fig. 3. X-ray θ - 2θ diffraction ϕ scan of the {220} family of the reflections in the MgO film on Si(100) grown at 700°C.

혹은 (101) 우선배향을 가지는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 JCPDS카드의 분말 BaTiO₃ X선 회절분석 데이터에 의하면 (110) 혹은 (101) 피크는 (100) 혹은 (001) 피크보다 약 4배의 강도를 나타낸다. 따라서 아무런 방향성을 지니지 못한 분말일 경우에도 (110) 혹은 (101) 피크의 강도가 매우 크게 발생하므로 Fig. 4(b)의 경우에는 (110) 혹은 (101) 우선배향성이 있다고 판단하기 어려우며 오히려 완전 무배향의 박막으로 간주함이 타당할 것이다. 이러한 결과는 스퍼터링²¹⁾ 및 MOCVD²⁾방법으로 직접 Si(100) 기판에 증착된 BaTiO₃박막에 관한 연구보고들과 일치한다. 한편 [100] 우선배향성을 가진 MgO박막이 Si(100) 기판표면에 존재하는 경우 BaTiO₃박막은 비교적 강한 BaTiO₃ (*h*00) 혹은 (00*l*) 피크가 관찰되는 것으로 미루어 보아 이 박막은 (*h*00) 혹은 (00*l*) 우선배향성을 지님을 알 수 있다. 따라서 MgO박막은 Si(100) 기판에 BaTiO₃박막을 성장시킬 때 BaTiO₃의 배향성을 증진시키는 역할을 한다고 판단된다.

제조된 BaTiO₃박막의 표면 및 단면 SEM 관찰결과를 Fig. 5에 보였다. MgO(100) 단결정 기판에 증착된 BaTiO₃박막은 치밀한 주상(columnar)구조를 보인다. 아울러 표면에서 관찰되는 BaTiO₃입자의 faceting이 특별한 방향성을 나타내지 않는 것으로 보아 근본적으로

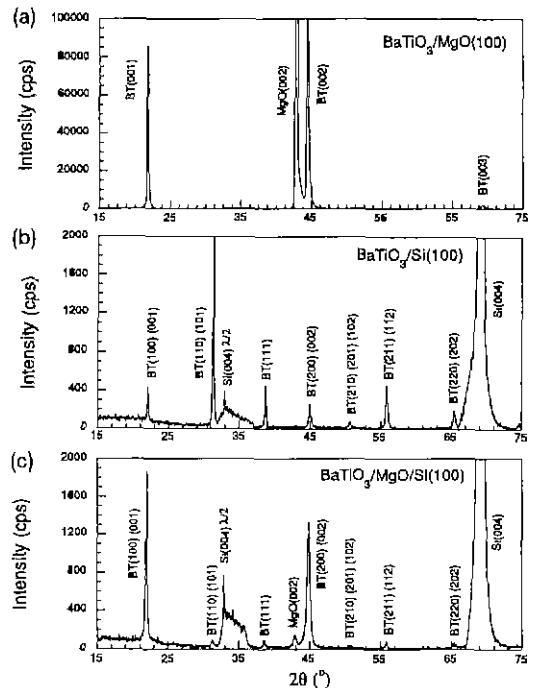


Fig. 4. X-ray θ - 2θ diffraction patterns of the BaTiO₃ films grown on (a) MgO(100) (b) Si(100) (c) MgO/Si(100).

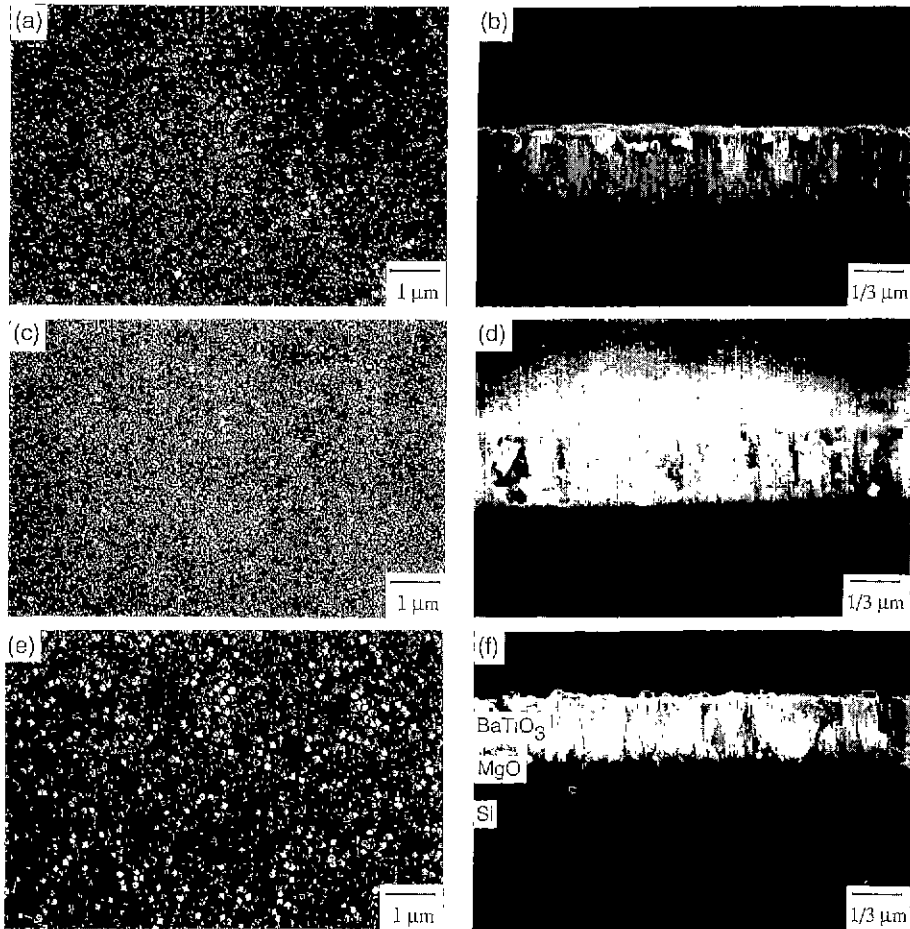


Fig. 5. Surface and cross-sectional SEM images of the BaTiO₃ films grown on MgO(100); (a) (b) Si(100); (c) (d) and MgO/Si(100); (e) (f), respectively.

는 다결정의 입자로 형성된 박막으로 판단된다. Si(100) 기판에 직접 증착된 BaTiO₃박막의 경우에도 비슷한 주상구조가 관찰되지만 표면에 큰 균열이 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 균열은 BaTiO₃박막의 전기적 물성을 현저하게 저하시킬 것으로 여겨진다. 반면에 MgO 완충층이 있는 Si 기판에 증착된 BaTiO₃박막의 경우에는 표면균열이 관찰되지 않으며, 전반적으로 MgO 단결정 기판에 증착된 BaTiO₃박막의 미세구조와 유사한 양상을 나타낸다. 그러나 단면 미세구조의 경우 단결정 MgO 기판에 제조된 BaTiO₃박막에 비하여 표면평활도가 다소 저하되었으며, 이는 Fig. 2(d)에서 관찰된 MgO 완충층의 hill-rock이 BaTiO₃박막의 성장에 영향을 미친 것으로 판단된다.

BaTiO₃박막의 전기적 특성을 측정하기 위한 전극으로 Pt박막을 채택하였다. Fig. 6은 Pt하부전극상에 증착된 BaTiO₃박막의 X선 회절분석을 나타낸다. Fig. 6(a)

의 경우, MgO(100) 단결정 기판에 증착된 Pt 박막은 강한 (001) 우선배향성을 지니고 있으며, 이러한 결과는 Pt박막이 MgO(100) 단결정 기판과 cube-on-cube 에피택시 관계를 가진다는 기존의 보고²²⁾와 일치한다. Pt/MgO(100) 기판에 증착된 BaTiO₃박막은 매우 강한 (h00) 혹은 (00l) 우선 배향성을 지니며, 이와 유사한 결과를 Lu 등²³⁾은 Pt/MgO(100) 기판에 MOCVD방법으로 증착된 BaTiO₃박막에서 보고한 바 있다. Fig. 6(b)에서 Si(100)기판에 증착된 Pt박막은 강한 (111) 우선배향성을 보이고 있으며, 이 Pt/Si(100) 기판에 증착된 BaTiO₃박막은 무배향성을 나타낸다. MgO 완충층을 사용한 경우 Pt박막은 (h00) 혹은 (00l) 우선배향성을 보이며, 그 위에 증착된 BaTiO₃박막도 역시 (h00) 혹은 (00l) 우선배향성을 나타낸다.

이러한 BaTiO₃박막위에 상부전극으로 Pt 박막을 스퍼터링 방법으로 증착하여 MIM구조를 만든 후 주파수

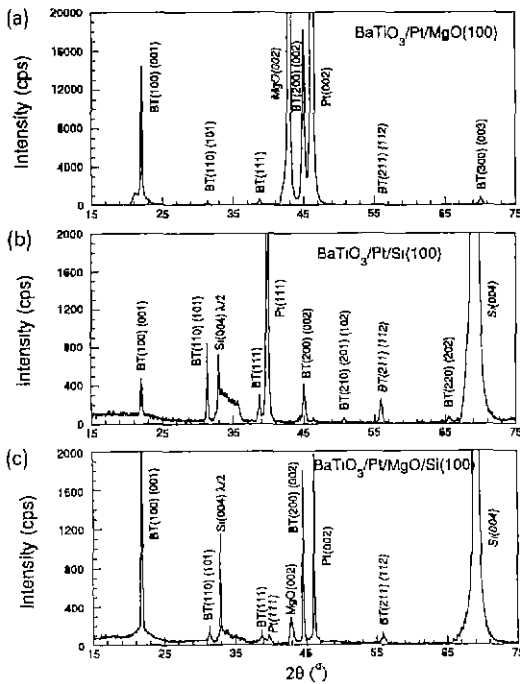


Fig. 6. X-ray θ - 2θ diffraction patterns of the BaTiO₃ films grown on (a) Pt/MgO(100) (b) Pt/Si(100) and (c) Pt/MgO/Si(100).

에 따른 유전상수 및 손실계수를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Pt/BaTiO₃/Pt/MgO(100)와 Pt/BaTiO₃/Pt/MgO/Si(100) 적층구조(multistructure)에서는 주파수가 증가함에 따라 유전상수가 감소하는 양상을 나타낸다. 이러한 유전상수의 분산(dispersion)은 전극저항 및 전극과 BaTiO₃박막의 계면층을 고려한 병렬 impedance로 해석이 가능하다.²⁴⁾ 또한 낮은 주파수 영역에서는 BaTiO₃박막에 존재하는 입계가 유전율을 대표하는 특성으로 인하여 주파수 의존성이 더욱 심화되었으며, Pt/BaTiO₃/Pt/MgO(100)인 경우가 Pt/BaTiO₃/Pt/MgO/Si(100)인 경우보다 높은 유전상수를 보이는 것은 단결정 MgO 기판에 제조된 BaTiO₃박막이 상대적으로 높은 치밀성 및 결정성을 가지기 때문으로 판단된다. 한편 Pt/BaTiO₃/Pt/Si(100) 적층구조에서는 Pt와 Si 기판의 상호확산에 의한 Pt-silicide 및 다른 제 2상에 의한 계면영향이 주파수에 관계없이 낮은 유전상수를 나타낸 것으로 보이며, 이러한 결과의 명확한 해석을 위하여 향후 더욱 자세한 연구가 필요하다고 사료된다. 현재까지 MgO박막이 Si(100) 기판상에 우수한 강유전체 박막을 제조하기 위한 효과적인 완충층임을 전기적 특성의 측면에서 검증한 연구결과는 아직 발표되지 않고 있다. 그러나 Si 기판에 MgO 완충층을 활용한

요약화되지

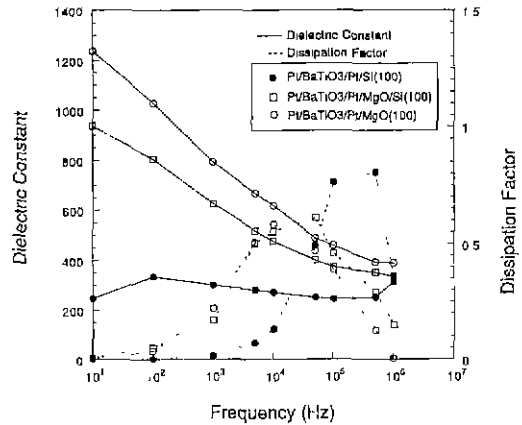


Fig. 7. Dielectric constants and dissipation factors of Pt/BaTiO₃/Pt metal-insulator-metal type capacitors on MgO(100), Si(100) and MgO/Si(100) substrates.

YBCO고온초전도체 박막의 경우에는 MgO 완충층이 없는 경우 혹은 ZrO₂ 등의 다른 완충층을 활용한 경우에 비하여 우수한 초전도 특성이 얻어짐이 보고되고 있다.^{17,20)} YBCO의 결정구조가 근본적으로 BaTiO₃와 같은 perovskite계 강유전체와 유사함을 고려하면 MgO박막이 Si 기판에 강유전체 박막을 제조할 경우 효과적인 완충층으로 작용할 가능성이 높으며, 향후 이의 명확한 검증도 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

(h00) 혹은 (00l) 우선배향성을 지닌 BaTiO₃박막을 MgO 완충층을 성장시킨 Si(100) 기판에 스퍼터링 방법으로 제조하였다. Si(100) 기판에 성장된 MgO박막은 (001) 우선배향성을 지녔으며, 그 정도는 증착온도가 높을수록 증가하는 양상을 보였다. Si(100) 기판에 직접 증착된 BaTiO₃박막은 무배향성의 박막이었고 표면에 균열이 발생하였다. 반면 MgO 완충층을 적용한 경우의 BaTiO₃박막은 (h00) 혹은 (00l) 우선배향성을 지녔으며, 표면균열도 발생하지 않았다. 결정배향성, 미세구조 및 전기적 특성을 MgO(100) 단결정 기판에 증착된 에피탁시 BaTiO₃박막을 기준으로 비교한 결과 MgO박막은 Si(100)기판에 배향된 BaTiO₃박막을 제조하기 위한 적절한 완충층으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 X선 회절분석을 도와 준 포항공과대학교의 강영민 박사에게 감사드립니다. 아울러 본 연구는 한국

과학재단의 지원(971-0802-016-2)에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. J. M. Mir and J. A. Agostinelli, "Optical Thin Films for Wave Guide Applications," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A12(4)** 1439-1445 (1994).
2. B. Bihari, J. Kumar, G. T. Stauff, P. C. Van Buskirk and C. S. Hwang, "Investigation of Barium Titanate Thin Films on MgO Substrates by Second-Harmonic Generation," *J. Appl. Phys.*, **76(2)** 1169-1174 (1994).
3. F. J. Walker, R. A. Mckee, H. W. Yen and D. E. Zelman, "Optical Clarity and Wave Guide Performance of Thin Film Perovskites on MgO," *Appl. Phys. Lett.*, **65(12)** 1495-1497 (1994).
4. S. Kim, S. Hishita, Y. M. Kang and S. Baik, "Structural Characterization of Epitaxial BaTiO₃ Thin Films Grown by Sputter Deposition on MgO(100)," *J. Appl. Phys.*, **78(9)** 5604-5608 (1995).
5. T. Nose, H. T. Kim and H. Uwe, "Dielectric Property of Epitaxial Films of BaTiO₃ Synthesized by Laser Ablation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33(9B)** 5259-5261 (1994).
6. C. S. Chern, J. Zhao, L. Luo, P. Lu, Y. Q. Li, P. Norris, B. Kear, F. Cosandey, C. J. Maggiore, B. Gallois and B. J. Wilkens, "Epitaxial Growth of BaTiO₃ Thin Films by Plasma-Enhanced Metalorganic Chemical Vapor Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **60(9)** 1144-1146 (1992).
7. B. S. Kwak, K. Zhang, E. P. Boyd, A. Erbil and B. J. Wilkens, "Metalorganic Chemical Vapor Deposition of BaTiO₃ Thin Films," *J. Appl. Phys.*, **69(2)** 767-772 (1991).
8. M. H. Yeh, Y. C. Liu, K. S. Liu, I. N. Lin, J. M. Y. Lee and H. F. Cheng, "Electrical Characteristics of Barium Titanate Films Prepared by Laser Ablation," *J. Appl. Phys.*, **74(3)** 2143-2145 (1993).
9. B. S. Kwak, E. P. Boyd, K. Zhang, A. Erbil and B. J. Wilkens, "Metalorganic Chemical Vapor Deposition of [100] textured MgO Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **54(25)** 2542-2544 (1989).
10. R. Pinto, J. P. Poothra, S. C. Purandare, S. P. Pai, C. P. D'Souza, D. Kumar and M. Sharon, "Growth and Microstructural Study of Radio Frequency Magnetron Sputtered MgO Films on Silicon," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A 9(5)** 2670-2674 (1991).
11. H. Z. Durusoy, "Growth Structures of MgO Films on Si(100) and Si(111) Surfaces," *J. Mat. Sci. Lett.*, **10**, 1023-1025 (1991)
12. R. Huang and A. H. Kitai, "Temperature-Dependence of the Growth Orientation of Atomic Layer Growth MgO," *Appl. Phys. Lett.*, **61(12)** 1450-1452 (1992).
13. S. Horita, M. Murakawa and T. Fujiyama, "Heteroepitaxial Growth of Ytria-Stabilized Zirconia Film on Silicon by Reactive Sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34(4A)** 1942-1946 (1995).
14. M. B. Lee, M. Kawasaki, M. Yoshimoto and H. Koinuma, "Heteroepitaxial Growth of BaTiO₃ Films on Si by Pulsed Laser Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **66(11)** 1331-1333 (1995).
15. T. Inoue, Y. Yamamoto, S. Koyama, S. Suzuki and Y. Ueda, "Epitaxial Growth of CeO₂ Layers on Silicon," *Appl. Phys. Lett.*, **56(14)** 1332-1333 (1990)
16. M. Tonouchi, Y. Sakaguchi and T. Kobayashi, "Epitaxial Growth of NbN on an Ultrathin MgO/Semiconductor System," *J. Appl. Phys.*, **62(3)** 961-966 (1987)
17. K. Harada, N. Fujimori and S. Yazu, "Y-Ba-Cu-O Thin Film on Si Substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27(8)** L1524-L1526 (1988).
18. B. M. Gallois, T. M. Besmann and M. W. Stott, "Chemical Etching of Silicon(100) by Hydrogen," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77(11)** 2949-1952 (1994).
19. S. Kim and S. Hishita, unpublished work.
20. D. K. Fork, F. A. Ponce, J. C. Tramontana and T. H. Gaballe, "Epitaxial MgO on Si(100) for Y-Ba-Cu-O Thin-Film Growth by Pulsed Laser Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **58(20)** 2294-2296 (1991).
21. J. K. G. Panitz and C. C. Hu, "Radio-Frequency-Sputtered Tetragonal Barium Titanate Films on Silicon," *J. Vac. Sci. Technol.*, **16(2)** 315-318 (1979).
22. Y. Yano, K. Iijima, Y. Daitoh, T. Terashima, Y. Bando, Y. Watanabe, H. Kasatani and H. Terauchi, "Epitaxial Growth and Dielectric Properties of BaTiO₃ Films on Pt Electrodes by Reactive Evaporation," *J. Appl. Phys.*, **76(12)** 7833-7838 (1994).
23. H. A. Lu, L. A. Wills and B. W. Wessels, "Electrical Properties and Poling of BaTiO₃ Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **64(22)** 2973-2975 (1994).
24. M. Sayer, V. Kumar, D. Barrow, L. Zou and D. Amm, "Integrated Piezoelectric and Pyroelectric Devices from Thin Film Ferroelectrics," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **243**, 39-48 (1992).